

含淹没植物明渠近床面区紊流特征高度试验研究

闫 静^{1,2}, 陈 扬², 戴 坤³, 张 明²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518021)

摘要:为研究含淹没植物明渠紊流统计参数垂向分布突变位置、理论床面和渗透高度的关系,进行了含淹没刚性植物明渠水流试验,使用圆柱铝棒模拟刚性植物,采用激光多普勒流速仪(LDV)测量流场,对由纵向流速、雷诺应力、局部阻力系数分布确定的特征高度和渗透高度进行研究,比较各类紊流特征高度的相对位置,分析植物密度与淹没度对其的影响。试验结果表明,在植物密度较大的情况下,近床面区流速沿垂向保持常数,雷诺应力梯度较小,一定高度处分布规律发生明显变化,能够较容易地确定流速梯度和雷诺应力梯度突变位置,淹没度对由3种方法确定的特征高度影响不明显;各种方法确定的特征高度中,雷诺应力特征高度与渗透高度更加接近;渗透高度随植物密度与淹没度的增大而增大;渗透高度与理论床面高度存在一定的线性关系。

关键词:含淹没植物明渠;流动不均匀性;紊流特征高度;渗透高度;理论床面高度;试验研究

中图分类号:TV143 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2016)05-0028-06

Experimental study on turbulence characteristic height near bed area in open channel flow with submerged vegetation//YAN Jing^{1,2}, CHEN Yang², DAI Kun³, ZHANG Ming² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Guang Dong Yue Gang Water Supply Company, Shenzhen 518021, China)

Abstract: In order to investigate the relationships among the sudden variation positions of vertical distributions of turbulent statistical parameters, the zero-plane displacement, and the penetration height, laboratory flume experiments with submerged rigid vegetation were carried out. Aluminum cylinders were used to simulate rigid vegetation and laser Doppler velocimetry (LDV) was utilized to measure the flow fields. The characteristic heights, determined by longitudinal velocity, Reynolds stress, local drag coefficient distribution, respectively, and the penetration height are discussed to compare their relative positions and analyze the effects of vegetation density and submergence on them. Experimental results show that, under high-density conditions, velocity along the vertical direction nearly remains constant, the gradient of Reynolds stress is low near the bed, and the sudden increase positions of the gradients of velocity and Reynolds stress distribution can be easily determined because distinct variations of their distribution patterns exist at certain heights. The influence of submergence on these characteristic heights is not obvious. Compared with other characteristic heights, the one determined by Reynolds stress is most approximate to the penetration height. Moreover, penetration height increases with the increase of vegetation density and submergence. Penetration height has a linear relationship with the zero-plane displacement.

Key words: open channel with submerged vegetation; flow heterogeneity; turbulence characteristic height; penetration height; the zero-plane displacement; experimental study

植物作为河流生态系统的重要组成部分,具有不可替代的作用。植物对污染物的吸收作用,能够提高河流的自净能力,净化河流的水质^[1];植物改变了河流阻力和水流结构^[2],使河流中推移质泥沙输移率减小,有利于减缓水土流失,稳固岸坡和边滩。鉴于植物的生态效益,越来越多的河流管理者认识到植物在河流中的重要性,倡导建设含植物的生态河道^[3-4]。

含植物条件下的明渠流动,与其他粗糙床面明渠流动具有一定的相似性,即在垂向具有较强的不均匀性^[5-6],许多学者建议在垂向对流动进行分区,在各区寻找现象化模型^[7-8]对含植物明渠紊流结构进行描述。研究者对流动分区存在不同的划分观点(两区和三区),两区划分的分区界限较为一致,即植物顶端作为分界线,流动分为植物层和植物层以上区域,分界位置附近处紊动强度、雷诺应力发生突

变、达到最大值,分界位置以上(植物层以上区域)流速满足对数分布。三区划分将流动分为近床面区、掺混区、自由水面区,各分区界限和流动类型的确定未达成统一的认识^[9]。对于三区流动划分中近床面区的上边界位置,Ei-Hakim 等^[10]认为是流速自床面至水面开始偏离幂律、满足线性分布规律的位置,Carollo 等^[11]认为是流速自床面至水面开始遵循对数分布规律的起点位置。两位学者提出的近床面区上边界均位于植物顶部以下。实际上,含淹没植物明渠的一个显著特点是在植物顶端附近,即植物层和上部水流层交界处,产生 Kelvin-Helmholtz 涡(简称 KH 涡)^[12]。KH 涡自产生便顺水流方向不断向下游发展,达到稳定状态会渗入植物层一定深度,Nepf 等^[13]将 KH 涡进入植物层的下边界所在位置作为植物层纵向交换区(最靠近床面区)和植物层垂向交换区(KH 涡下边界至植物顶端区域)的分界。类似地,在该分界位置附近,紊动强度、雷诺应力出现极值。Tang 等^[14]发现在淹没植物层内部,植物局部阻力系数分布具有明显的垂向分区特点,能够较好地反映阻力沿垂向的不均匀性。

上述用于判定近床面区上边界的位置,如流速、局部阻力系数垂向分布规律发生改变的位置,能够反映紊流结构的垂向不均匀性,笔者将该类位置对应的高度称为紊流特性特征高度(具体包括流速特征高度、雷诺应力特征高度、局部阻力系数特征高度),将渗透高度称为紊流结构特征高度,两者统一称为紊流特征高度。

本研究选用圆柱铝棒模拟刚性植物,采用激光多普勒测速仪(LDV)进行流场测量,将由流速、雷诺应力、植物局部阻力系数分布确定的紊流特性特征高度与渗透高度进行比较,以分析植物密度和淹没度对这些参数的影响,并研究渗透高度与理论床面高度之间的关系。

1 紊流特征高度及其确定方法

1.1 流速特征高度

一般而言,含淹没植物明渠水流流速分布的一个明显特点是存在拐点,该点为流速分布拟合曲线凸、凹函数的分界点,大致位于植物顶端。有学者指出,在含植物明渠水流近床面区域,流速沿垂向变化较小,可以近似看作常数^[8,15],随着水深的增大,流动沿垂向出现较强的不均匀性,流速梯度存在突然增大的突变点。本文将平均流速梯度,即 dU/dy (U 为时间空间双平均后的纵向平均流速, y 为与床面的距离)垂向分布突然增大处的高度,作为流速特征高度,记作 y_U ,绘制 $dU/dy-y$ 关系曲线,可确定 y_U 。

1.2 雷诺应力特征高度

雷诺应力分布能够反映水流动量交换的剧烈程度。在植物顶端附近,雷诺应力达到最大值。在植物层,雷诺应力在靠近床面区域内变化较小,在某一位置至植物顶端范围内变化幅度增大。本文将雷诺应力梯度 $-d\overline{uv}/dy$ (u 为纵向脉动流速, v 为垂向脉动流速)垂向分布突然增大处的高度,作为雷诺应力特征高度,记作 $y_{-\overline{uv}}$,绘制 $-d\overline{uv}/dy-y$ 关系曲线,可确定 $y_{-\overline{uv}}$ 。

1.3 局部阻力系数特征高度

局部阻力系数 C_{DL} 能够描述植物阻力的微观变化,即植物对局部水流的阻滞程度。Tang 等^[14]采用圆柱棒模拟刚性植物,将单位水体作为研究对象,沿水流方向进行受力分析,确定了局部阻力系数的计算公式:

$$C_{DL} = C_{Dg} + C_{Ds} = \frac{2\left(1 - \frac{\pi}{4}d_v a\right)\left(gS - \frac{\partial \overline{uv}}{\partial y}\right)}{aU^2} \quad (1)$$

式中: C_{Dg} 和 C_{Ds} 分别为重力和剪切力引起的局部阻力系数; d_v 为植物直径; a 为植物密度,即单位水体积内的植物迎流面积; S 为底坡; g 为重力加速度。

试验研究^[16]表明, C_{DL} 的垂线分布在靠近床面区域近似为常数,随着高度增大至某一位置, C_{DL} 呈先增大后减小的变化规律。将 C_{DL} 开始增大之处所在高度,作为局部阻力系数特征高度,记作 y_{C_0} 。

1.4 渗透高度

含淹没植物水流条件下,KH 涡控制植物顶端附近水流的动量交换与污染物输移,其尺度大小决定了剪切层的尺度。将 KH 涡进入植物层的下边界位置定义为渗透高度 h_p ,Nepf 等^[17]取 10% 的最大雷诺应力之处所在高度为渗透高度。Nepf 等^[13]采用下式来定义渗透深度 δ_e (即 KH 涡进入植物层的深度):

$$\delta_e = \frac{U_k}{\partial U/\partial y_{y=k}} \quad (2)$$

式中: U_k 为流速分布拐点处的流速值; $\partial U/\partial y_{y=k}$ 为拐点处流速分布切线的斜率。

渗透高度和渗透深度满足:

$$h_p = H_v - \delta_e \quad (3)$$

式中 H_v 为植物高度。 h_p 与 δ_e 的关系见图 1。

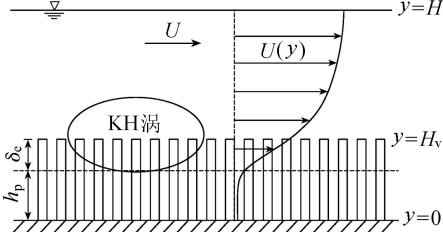


图 1 渗透高度与渗透深度关系示意图

Nepf 等^[13]认为在植物顶端附近,仅有紊流剪切产生项和冠层耗散项对紊动能的平衡起作用,通过理论分析,对公式(2)进行推导,从紊动能平衡的角度得出以下关系:

$$\frac{\delta_e}{H_v} = \frac{C_{SL}}{C_D a H_v} \quad (4)$$

式中: C_D 为植物整体阻力系数; C_{SL} 为冠层剪切层参数,是 U_k 、 $\partial U / \partial y_{y=k}$ 、 C_D 及 a 的函数,约为 0.23 ± 0.06 。此公式适用范围为 $C_D a H_v > 0.1$, 淹没度 $S_{ub} \geq 2$, 这是因为需要满足流速拐点能够形成, KH 涡能够产生且能自由发展而不受水面限制的条件。另外, Luhar 等^[18]指出在 $C_D a H_v = 0.1 \sim 0.23$ 的范围内, KH 涡占据整个植物层且渗入床面,即 $\delta_e \geq H_v$, $h_p \leq 0$ 。本文采用公式(4)计算 δ_e , 其中 C_D 由 Cheng 等^[19]提出的水力半径估计阻力法确定。

1.5 理论床面高度

很多研究表明,通过合理地调整理论床面高度 d 和当量粗糙高度 k_s 的值,含植物明渠水流垂线流速分布可用对数分布律描述,表达式如下:

$$\frac{U}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y-d}{k_s} + C \quad (5)$$

式中: u_* 为摩阻流速; κ 为卡门常数,约为 0.4; C 为与床面条件有关的积分常数,约为 8.5。

一般认为,对于实测平均流速垂向分布,使用对数律进行拟合,可以确定 u_* 、 d 以及 k_s 。实际上,对数拟合法有较大的主观性,参数的精确确定难度较大^[20]。

在空气动力学中,理论床面高度与空气动力学粗糙度能够有效地描述和估计糙元的空气动力学特性及其对地表风蚀抑制效应^[21]。Thom^[22]认为理论床面高度是植物耗散水流量的平均高度,计算式表达如下:

$$d = \frac{\int_0^H \frac{d\bar{u}\bar{w}}{dy} y dy}{\int_0^H \frac{d\bar{u}\bar{w}}{dy} dy} \quad (6)$$

本文采用公式(6)计算理论床面高度。

2 试验装置和试验方法

2.1 试验装置

试验在长 12 m、宽 0.42 m、高 0.7 m 的可变坡矩形玻璃水槽中进行,水槽系统如图 2 所示。水槽进口处设有水流矫直机用以平稳水流,通过升降螺杆来调节水槽底坡(水槽变坡范围为 $-5\% \sim 3\%$),控制水槽尾门的开度来调节水深。水槽底部铺设 1 层灰塑板,板面均匀钻孔,用以固定模拟植物,水流方向相邻 2 排孔的间距为 5 cm,横向相邻 2 排孔间距为 1 cm。采用高度为 6 cm,直径为 6 mm 的圆柱铝棒

模拟刚性植物,植物带铺设长度为 8 m,植物对齐排列。为了满足激光多普勒测速仪(LDV)测量时的光路要求,模拟植物顺水流方向间距 S_x 均为 5 cm,横向间距 S_z 分别为 1 cm、2 cm 和 4 cm,以满足不同植物密度设计要求。采用安装在进水管道的超声波流量计测量流量,通过安置在距离上游进水口处 2 m 和距离下游出水口处 2 m 的测针测量水位,精度为 1 mm。采用由激光探头、信号处理器和数据处理系统组成的 LDV 系统测量流场,采样频率范围大致为 100 ~ 200 Hz,采样时间为 30 s。

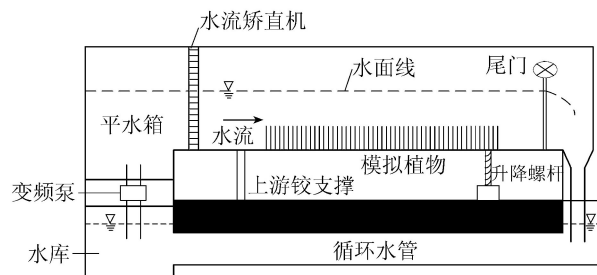


图2 水槽系统示意图

2.2 试验设计和试验方法

试验选择距上游进水口 (8.4 ± 0.075) m 的 3 个断面作为测量横断面,在各断面上沿横向布置了多条垂线进行流场测量,对不受边壁影响范围内的数据进行 3 个断面的纵向空间平均。试验中,由于要保证激光器发射的垂向 2 束激光均在自由水面以下、床面以上,只能在 $1.5 \text{ cm} < y < H - 1.5 \text{ cm}$ 的范围内进行二维测量(H 为水深),其余水深范围内为一维测量(即测量沿水流方向水力要素,该范围内雷诺应力由二维测量区测值拟合推算得到)。试验水流条件见表 1。

3 试验结果与讨论

3.1 紊流特征高度

利用流速分布得到流速梯度突变曲线,进而得到流速特征高度 y_U (图 3);利用雷诺应力分布得到雷诺应力梯度突变曲线,进而得到雷诺应力特征高度 $y_{-\bar{w}}$ (图 4)。图 5 是 3 种不同植物密度条件下垂向流速、雷诺应力、局部阻力系数垂线分布及其特征高度(以相同淹没度的工况 A2、B2、C2 为例)。渗透高度由公式(3)确定,渗透深度由公式(4)确定,本试验条件下 C_{SL} 在 0.167 ~ 0.290 范围内, C_D 在 1.08 ~ 1.87 范围内。

植物密度较大情况下(A 系列),在近床面区域流速几乎保持常数,雷诺应力梯度变化较小,随着垂向高度 y 的增大,在 y_U 、 $y_{-\bar{w}}$ 处流速和雷诺应力梯度突然增大,从而可确定 y_U 及 $y_{-\bar{w}}$;植物密度相对较小情况下(C 系列),近床面区域流速和雷诺应力梯度

分布均呈逐渐增大趋势, y_U 、 $y_{-\overline{uv}}$ 较难确定, 如图 5(c) 所示。

对比各种植物密度下的局部阻力系数分布, 发现 A 系列 C_{DL} 从床面至高度 y_C 处表现出减小的规

表 1 含刚性植物水槽均匀流试验条件

工况	水深 H/cm	流量 $Q/(\text{L} \cdot \text{s}^{-1})$	底坡 $S/10^{-3}$	断面平均流速 $U_m/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 $Re/10^4$	弗劳德数 Fr	横向间距 S_z/cm	植物密度 a/m^{-1}	淹没度 S_{ub}
A1	12	14.40	12.82	0.2857	3.005	0.263	1	12	2
A2	18	23.22	4.80	0.3071	4.845	0.231	1	12	3
A3	24	30.24	2.21	0.3071	6.460	0.200	1	12	4
A4	30	36.80	1.21	0.3000	7.888	0.175	1	12	5
B1	12	14.60	7.20	0.2897	3.047	0.267	2	6	2
B2	18	22.68	3.05	0.3000	4.733	0.226	2	6	3
B3	24	30.24	1.50	0.3000	6.310	0.196	2	6	4
B4	30	36.80	1.11	0.2921	7.679	0.170	2	6	5
C1	12	15.12	3.73	0.3000	3.155	0.277	4	3	2
C2	18	22.68	2.60	0.3000	4.733	0.226	4	3	3
C3	24	30.24	1.09	0.3000	6.310	0.196	4	3	4
C4	30	36.80	0.65	0.2921	7.679	0.170	4	3	5

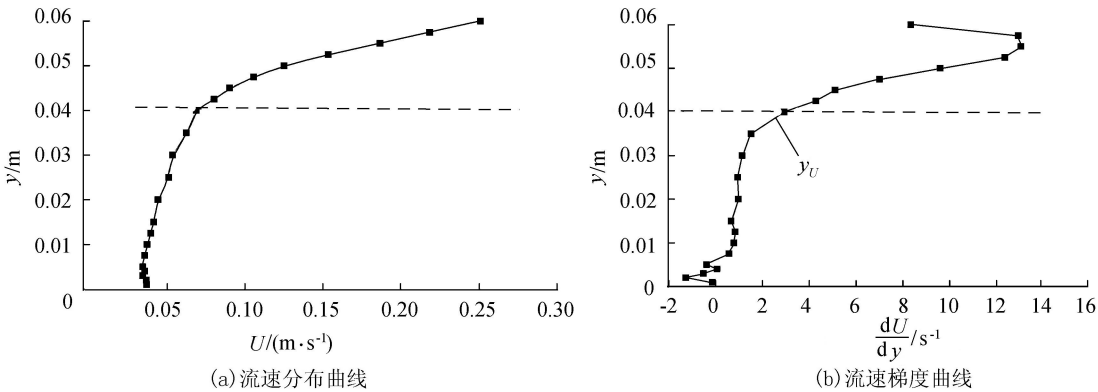


图 3 流速特征高度的确定(工况 A2)

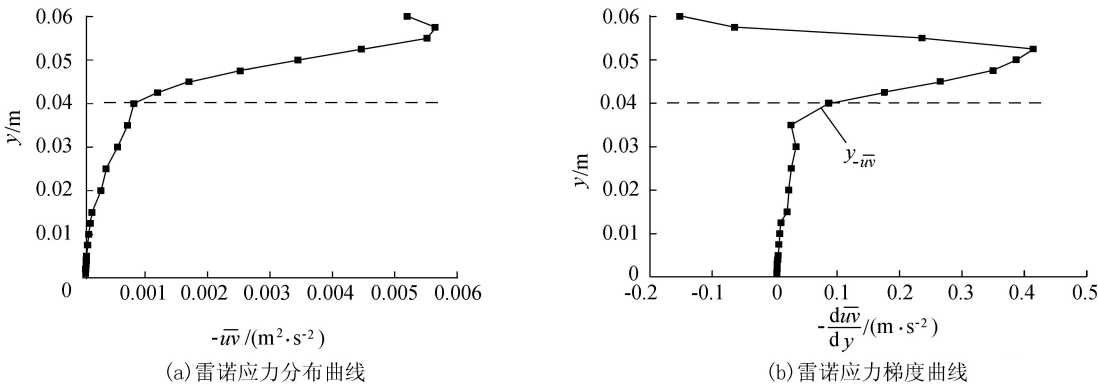


图 4 雷诺应力特征高度的确定(工况 A2)

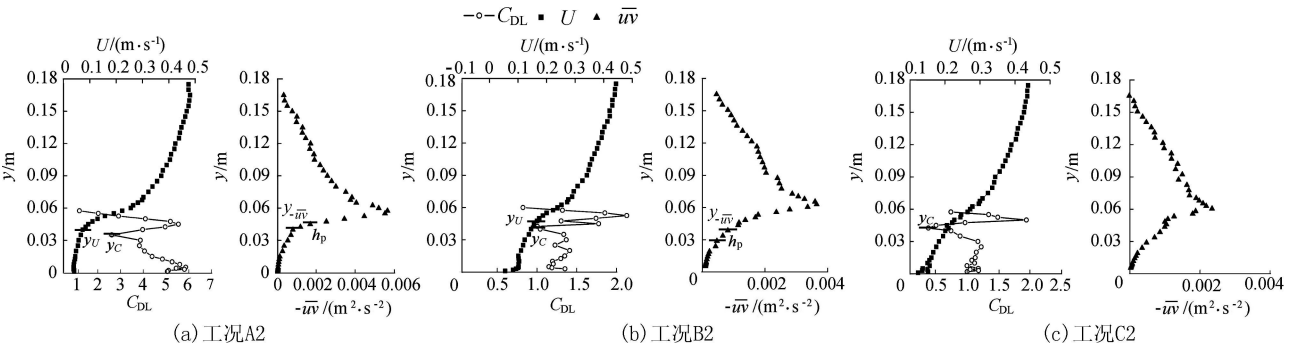


图 5 不同植物密度下垂向流速、雷诺应力、局部阻力系数分布以及特征高度

律,B、C 系列 C_{DL} 在近床面区变化不大,后者与 Tang 等^[14] 试验结论一致,这可能是由于本试验 A 系列采用的植物密度较大(Tang 等^[14] 采用的植物密度均小于本研究 A 系列植物密度)。在 y_c 处 3 种系列 C_{DL} 均沿 y 方向逐渐增大。

表 2 列出了 A 系列不同淹没度下 4 种特征高度。从表 2 可以看出,特征高度 y_U 、 $y_{-\overline{w}}$ 、 y_c 随淹没度的变化并不明显。将 A 系列紊流特征高度 y_U 、 $y_{-\overline{w}}$ 、 y_c 与 h_p 的偏差百分比同时列于表 2,以分析 4 种特征高度之间的差异。结果表明,雷诺应力特征高度 $y_{-\overline{w}}$ 与渗透高度 h_p 最为接近。

表 2 A 系列不同淹没度下各紊流特征高度

工况	S_{ub}	y_U/m	$y_{-\overline{w}}/m$	y_c/m	h_p/m	$\frac{y_U-h_p}{h_p}/\%$	$\frac{y_{-\overline{w}}-h_p}{h_p}/\%$	$\frac{y_c-h_p}{h_p}/\%$
A1	2	0.0425	0.0425	0.0400	0.0416	2.16	2.16	-3.85
A2	3	0.0400	0.0400	0.0350	0.0454	-11.89	-11.89	-22.91
A3	4	0.0450	0.0450	0.0425	0.0466	-3.43	-3.43	-8.80
A4	5	0.0400	0.0425	0.0425	0.0470	-14.89	-9.57	-9.57
均值		0.0419	0.0425	0.0400	0.0452	-7.01	-5.68	-11.28

3.2 植物密度与淹没度对渗透高度的影响

本试验 A、B 系列根据公式(3)和(4)确定的 h_p 处对应的雷诺应力,并不等于 10% 的最大雷诺应力,而是大于这一值,甚至达到 50% 的最大雷诺应力。何晔^[23] 采用柔性植物(硅胶棒模拟柔性植物)进行水槽试验, h_p 处对应的雷诺应力约为 5% 的最大雷诺应力。相比本文,何晔^[23] 与 Nepf 等^[17] 的结果更为接近。关于 h_p 的取值与雷诺应力分布的对应关系有待进一步研究。

本试验 C 系列 $C_D a H_v$ 的值在 0.196~0.213 范围内,计算得出此植物密度条件下的渗透高度 $h_p < 0$,这一结果与 Luhar 等^[18] 的结论一致。图 6 为 3 种密度下,渗透高度随淹没度的变化。从图 6 可以看出, h_p 随着植物密度的增大而增大,表明植物密度增大会阻碍 KH 涡进入植物冠层。另外,由 C 系列到 B 系列、由 B 系列到 A 系列植物密度均增加 1 倍,然而 h_p 并没有表现出同等程度的增大幅度,从 C 系列到 B 系列 h_p 的增幅明显大于从 B 系列到 A 系列的增幅。图 6 也表明,本试验条件下, h_p 随

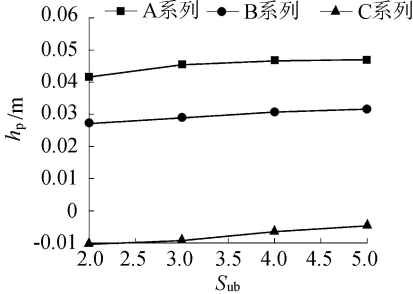


图 6 渗透高度随淹没度和植物密度的变化

淹没度的增大而增大,但变化幅度较小。

3.3 渗透高度与理论床面高度的关系

Luhar 等^[18] 指出,采用植物高度 H_v 作为无量纲尺度, d 与 h_p 存在如下关系:

$$\frac{d}{H_v} \approx 1 - \frac{\delta_e}{2H_v} = \frac{1}{2} + \frac{h_p}{2H_v} \tag{7}$$

Nikora 等^[24] 采用立方体、圆球等糙元模拟粗糙床面,通过水槽试验认为 KH 涡的下边界与理论床面高度所在位置几乎重合,满足下式:

$$\frac{d}{H_v} \approx 1 - \frac{\delta_e}{H_v} = \frac{h_p}{H_v} \tag{8}$$

两位学者均认为 h_p 与 d 满足线性关系。表 3 是本试验各工况渗透高度与理论床面高度的计算值。

表 3 渗透高度与理论床面高度计算值

工况	h_p/cm	d/cm	工况	h_p/cm	d/cm
A1	4.16	4.69	B3	3.07	4.66
A2	4.54	4.68	B4	3.16	4.41
A3	4.66	4.71	C1	-1.04	4.02
A4	4.70	4.69	C2	-0.09	3.90
B1	2.71	4.69	C3	-0.07	4.05
B2	2.89	4.70	C4	-0.05	4.04

将本试验 d/H_v 与 h_p/H_v 的关系以及公式(7)(8)计算结果同时绘制于图 7。从图 7 可以看出,本试验条件下的 h_p 与 d 较好地服从如下线性关系:

$$\frac{d}{H_v} = 0.6912 + 0.1317 \frac{h_p}{H_v} \quad (R^2 = 0.8899) \tag{9}$$

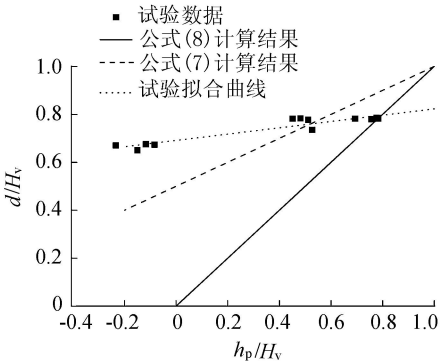


图 7 渗透高度与理论床面高度关系

4 结 论

- 在植物密度较大的情况下,近床面区垂向流速分布接近常数,雷诺应力梯度变化较小,在特征高度处流速梯度、雷诺应力梯度出现明显突变。淹没度对各种方法确定的紊流特性特征高度影响不明显。
- 相比其他特征高度,雷诺应力特征高度 $y_{-\overline{w}}$ 与渗透高度 h_p 更加接近。
- 渗透高度 h_p 随植物密度和淹没度的增大而增大。

d. 在本试验条件下的含淹没植物明渠水流中, 渗透高度 h_p (KH 涡的下边界) 与理论床面高度 d 之间仍存在线性关系。

参考文献:

- [1] 秦蕾蕾, 李嘉, 李春玲, 等. 3 种沉水植物对不同浓度生活污水净化效果试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(增刊2): 97-101. (QIN Leilei, LI Jia, LI Chunling, et al. Study on three submerged plants' purified effect in domestic sewage[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2013, 45(Sup 2): 97-101. (in Chinese))
- [2] WANG Hao, TANG Hongwu, ZHAO Hanqing, et al. Incipient motion of sediment in presence of submerged flexible vegetation[J]. Water Science and Engineering, 2014, 8(1): 63-67.
- [3] 卢军, 张利民, 岳强, 等. 秋冬季节植物-微生物系统治理新沂河效果分析[J]. 南京农业大学学报, 2005, 28(3): 58-62. (LU Jun, ZHANG Limin, YUE Qiang, et al. Effectiveness of purification of contaminated Xinyi River by plant-microorganism in fall and winter seasons[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2005, 28(3): 58-62. (in Chinese))
- [4] 吴福生, 王文野, 姜树海. 含植物河道水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 457-461. (WU Fusheng, WANG Wenye, JIANG Shuhai. Hydrodynamics development in vegetated open channel[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 457-461. (in Chinese))
- [5] 唐立模, 孙会东, 刘全帅. 明渠紊流与床面形态相互作用研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(2): 77-84. (TANG Limo, SUN Huidong, LIU Quanshuai. Research development of the interaction between turbulence structure and bedforms in open channel[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 77-84. (in Chinese))
- [6] 李李佳, 李志伟, 张长宽, 等. 基于 DARS 方程的粗糙床面明渠水力特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 29-34. (LI Jiajia, LI Zhiwei, ZHANG Changkuan, et al. Research on hydraulic characteristics of open-channel flow over rough bed based on DARS equations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(3): 29-34. (in Chinese))
- [7] POGGI D, PORPORATO A, RIDOLFI L. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 111: 565-587.
- [8] NEZU I, SANJOU M. Turbulence structure and coherent motion in vegetated canopy open-channel flows[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2008, 2(2): 62-90.
- [9] 闫静, 戴坤, 唐洪武, 等. 含植物河道紊流结构研究进展[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 915-922. (YAN Jing, DAI Kun, TANG Hongwu, et al. Advances in research on turbulence structure in vegetated open channel flows[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 915-922. (in

- Chinese))
- [10] EI-HAKIM O, SALAMA M M. Velocity distribution inside and above branched flexible roughness[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118(6): 914-927.
- [11] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 664-673.
- [12] RAUPACH M R. Turbulent in and above plant canopies[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1981, 13: 97-129.
- [13] NEPF H, GHISALBERTI M, WHITE B, et al. Retention time and dispersion associated with submerged aquatic canopies[J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): 436-451.
- [14] TANG Hongwu, TIAN Zhijun, YAN Jing, et al. Determining drag coefficients and their application in modeling of turbulent flow with submerged vegetation[J]. Advances in Water Resources, 2014, 69: 134-145.
- [15] NIKORA N, NIKORA V, O DONOGHUE T. Velocity profiles in vegetated open-channel flows: combined effects of multiple mechanisms[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139: 1021-1032.
- [16] GHISALBERTI M, NEPF H M. The limited growth of vegetated shear layers[J]. Water Resources Research, 2004, 40(7): 196-212.
- [17] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(12): 28547-28557.
- [18] LUHAR M, ROMINGER J, NEPF H. Interaction between flow, transport and vegetation spatial structure[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2008, 8: 423-439.
- [19] CHENG N S, NGUYEN H T. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(9): 995-1004.
- [20] 闫静. 含植物明渠水流阻力及紊流特性的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [21] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 337-346. (LIU Xiaoping, DONG Zhibao. Review of aerodynamic roughness length[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(4): 337-346. (in Chinese))
- [22] THOM A S. Momentum absorption by vegetation[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97: 414-428.
- [23] 何晔. 植物条件下明渠紊流特性的研究[D]. 南京: 河海大学, 2013.
- [24] NIKORA V, KOLL K, MCLEAN S, et al. Zero plane displacement for rough-bed open-channel flows[C]// River Flow 2002: Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics. Louvain-la-Neuve: [s. n.], 2002: 83-91.

(收稿日期: 2015-08-30 编辑: 骆超)